

中国电机工程学会  
高压测量及试验技术年会

# 论文报告

## 用七极管瓦特表测量 介质游离功率

审核：李毅达

编写人：王济德

第一机械工业部高压电器研究所

一九六五年十月

## 目 录

导 言	1
游离功率	1
七极管测量工频有功功率	6
七极管测量游离功率的模拟研究	18
校核方法	25
用七极管瓦特计测量试品游离功率 的测量结果	31

### 导 言

在电气绝缘介内部有缺陷存在的时候，或者有小间隙（气隙、油隙等）存在的时候，随着它所承受的电压的提高，总会有一些或全部间隙中形成火花放电；这种放电一般就称之为局部放电或电气绝缘介质内部的游离。局部放电当然也包括沿间隙表面的滑闪。局部放电是要消耗能量的；所消耗的能量，绝大部分是消耗在绝缘介质的内部，转变为热能、化学能等促使绝缘介质内部结构发生变化，一般都是对绝缘起破坏作用，使绝缘逐渐老化。可以设想，这种破坏作用的大小是应和所消耗的能量的大小有密切关系的，消耗的能量越多，这种破坏作用可能越大。因此能把放电所消耗的能量或者功率（单位时间内所消耗的能量）测量出来对于估计这种破坏作用或估计绝缘寿命是会有用的。

目前，测量游离功率的方法有好几种，但是这些方法（二次平衡法，视波图法等）都各有缺点和局限性。或者是灵敏度不高（如示波图法），或者设备昂贵（如二次平衡法）等。

这里提出一种新的方法，七极管瓦特表法。

#### 游离功率

通常，绝缘内部游离放电的过程可以用图1所示的等效电路来进行研究，其中

- $C_A$  —— 产生放电的间隙；
- $C_B$  —— 电极间，与放电间隙串联的介质的完好部分；
- $C_C$  —— 电极间，介质的其余完好部分。

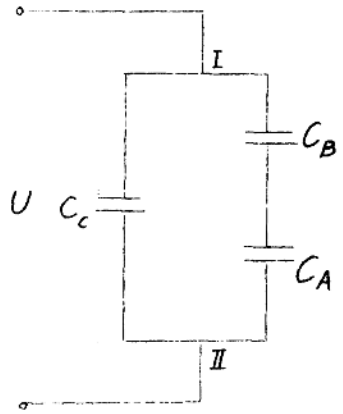


图1. 游离放电的等效电路

间隙放电时，间隙上的电压从放电前的  $U_{A1}$  降到  $U_{A2}$ ，

$$U_{A1} - U_{A2} = \Delta U_A \quad (1)$$

在一次放电过程中，消耗在放电间隙中的能量为：

$$\Delta W_A = \frac{1}{2} C_A (U_{A1}^2 - U_{A2}^2) \quad (2)$$

由于放电过程为  $10^{-7} - 10^{-8}$  秒的雪崩过程，而电源电路又具有很大的电感（一般为变压器），电源不能立刻向试品补充电荷，因此放电在试品两端必将引起压降  $\Delta U_C$

$$\Delta U_C = \frac{C_B}{C_B + C_C} \Delta U_A \quad (3)$$

所以，放电前后， $C_A$ ， $C_B$ ， $C_C$  电容系统的能量要发生改变，其变化为：

$$\Delta W_C = \frac{1}{2} \left( \frac{C_C \cdot C_B}{C_C + C_B} + C_A \right) [U_{A1}^2 - U_{A2}^2] \quad (4)$$

如果是重复性的多次电放电，那么  $N$  次放电所消耗的能量为：

$$W_C = \sum_{i=1}^{i=N} \Delta W_{C_i} \quad (5)$$

功率为 
$$P_C = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=N} \Delta W_{C_i} \quad (6)$$

式中， $T$  为时间， $N$  为  $T$  时间内间隙  $C_A$  中放电的次数，最后，电源要在放电时的电源电压下向电容系统补充能量  $\Delta W_y$ ，

$$\Delta W_y = \left( C_C + \frac{C_A \cdot C_B}{C_A + C_B} \right) U \cdot \Delta U_C \quad (7)$$

式中  $U$  为放电瞬间之电源电压

而 
$$\left( C_C + \frac{C_A \cdot C_B}{C_A + C_B} \right) \Delta U_C \simeq \Delta Q$$

故 
$$\Delta W_y \simeq \Delta Q \cdot U \quad (8)$$

式中  $\Delta Q$  可以看作电源向试品补充的电荷。

这一能量可以认为是放电间隙放电一次需要电源供给的能量。

如果考虑的是交流电压作用下，一系列重复性的放电，其中  $U$  就是放电时电源电压的瞬时值。如果  $T$  时间内间隙中有  $N$  次放电，那么放电时，试品向电源索取的功率可表示为

$$P_y = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=N} \Delta W_{y_i}$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=N} U_i \cdot \Delta Q_i \quad (9)$$

如果  $T$  时间内在许多间隙中共有  $M$  个点放电，则

$$P_y = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{j=M} \sum_{i=1}^{i=N} U_{ij} \cdot \Delta Q_{ij} \quad (10)$$

对于重复性放电而言，如果  $T$  时间内包含了放电循环周期一个以上（对于交流通常就是一个波为一循环周期）总的能量是平衡的，可以认为

$$P_c \approx P_y \quad (11)$$

下面的分析方法对于理解瓦特表测量游离功率的原理有帮助。

如果认为电流以电流脉冲的形式向试品补充放电所需要的能量，为方便起见把这一电流称为“游离电流”；电源同时还供给与电源电压同频率的电容电流。又如果试品串联一个纯电阻  $R$ ，如图 2 那样，那么在电阻  $R$  上流过的电流应为这两种形式的电流之和。

$$I = I_c + I_u \quad (12)$$

式中  $I_c$  为电容电流，与电源电压同频率。

式中  $I_u$  为“游离电流”

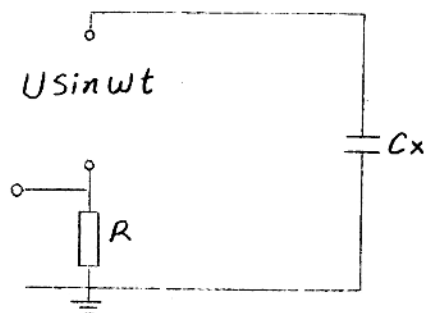


图 2. 从电阻上取出“游离电流”讯号

$i_0$  和  $i_u$  二者都在  $R$  上引起压降。因此  $R$  两端取出的电压波形（考虑一点放电）如图 3a 所示，在正弦的工频电压波上叠加了一系列脉冲讯号。

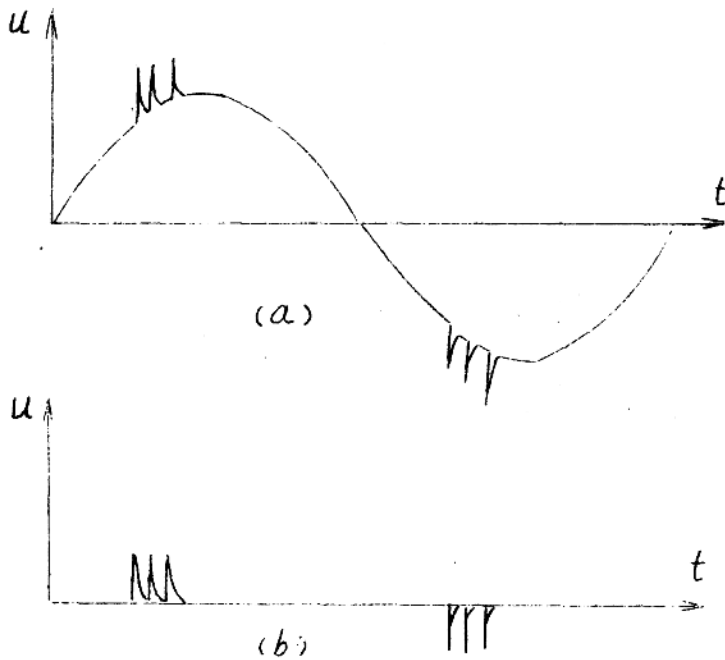


图 3. 从电阻  $R$  两端取出的波形

a, 滤波前,      b, 滤波后

如果用同一个滤波器，滤去与电源同频率的基波分量，则可以得到游离电流  $I_u$  在  $R$  上引起的电压降，其波形如图 3b 所示，为许多衰减脉冲组成。

$i_u$  本身又包含了两部分分量，一部分又是与电源的频率相同的，为  $i_{u0}$ ，另一部分是高频的为  $i_{uK}$

$$i_u = i_{u0} + i_{uK} \quad (13)$$

其瞬时值为

$$i_u = i_{u0} + i_{uK} \quad (14)$$

$$i_{u0} = I_{u0} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (15)$$

设想可将  $i_{uK}$  表示成富氏级数的形式

$$i_{uK} = I_{uK_1} \sin(\omega_{K_1} t + \theta_1) + I_{uK_2} \sin(\omega_{K_2} t + \theta_2) + \dots \quad (16)$$

“游离电流”  $i_u$  是由电源供给的，故电源供给的游离功率又可以表示为

$$\begin{aligned} P_y' &= \frac{1}{T} \int_0^T i_u \cdot u \, dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (i_{u0} + i_{uK}) u \, dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T i_{u0} u \, dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_{uK} u \, dt \quad (17) \end{aligned}$$

式 (17) 中  $u$  为电源电压

$$u = U \sin \omega t \quad (18)$$

因为， $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  都不等于  $\omega$ ，故有

$$\int_0^T i_{uK} \cdot u \, dt = 0$$

所以

$$\begin{aligned} P_y' &= \frac{1}{T} \int_0^T i_{u0} u \, dt \\ &= I_{u0} U \cos \theta_0. \quad (19) \end{aligned}$$

如果电流中有高次谐波， $u_1, u_2, \dots$  而“游离电流”中也有对应频率的谐波  $i_{u1}, i_{u2}, \dots$  则

$$\begin{aligned} P_y' &= \frac{1}{T} \int_0^T (i_{u0} + i_{u1} + i_{u2} + \dots)(u + u_1 + u_2 + \dots) \, dt \\ &= I_{u0} U \cos \theta_0 + I_{u1} U_1 \cos \theta_1 + I_{u2} U_2 \cos \theta_2 + \dots \quad (20) \end{aligned}$$

从式 (17) 和 (19), (20) 可以看到，如果能找到一个可完成式 (17) 的积分，亦即完成式 (19) 的积分的环节，就可以测量出游离功率来。通常的电动式瓦特计具有这种作用，可惜其灵敏度不够，多极电子管（五极管，七极管）也有这种作用，这是本文下面要

讨论的。

最后要说明一点，如果电阻只是连接在被试品和地之间，而不是接在电源和地之间，就像图4所表示的那样，这时，情况是和图2有所区别。

但这时，尺上取出的信号波形的队形仍和图3相似，如果二种情况下，脉冲都是指数衰减脉冲，则它们没有本质上的区别，只是其幅值不同，衰减常数也不同罢了；因此只影响其测量灵敏度，而不影响准确性。故我们认为，利用图4这种接法，同样可测量游离功率，而且应用上更加方便。

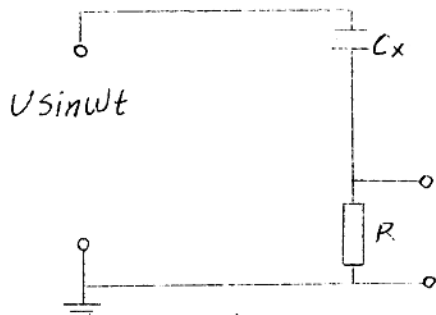


图4. 电阻接在被试品和地之间

### 七极管测量工频有功功率

1. 原理：一个具有两个控制栅极的电子管，例如五极管和七极混频管，在它的两个栅极加上两个角频率相同的交流信号以后，在它的阳极电流中不但会出现交流分量，而且会出现信号引起的直流分量，利用这个直流分量可以测量交流电压和电流作用下，负载上所消耗的有功功率，下面对这个问题作一说明。根据电子管的理论，两控制栅极电子管的阳极电流可以表达成台劳级数。下面分析一下五极管阳极电流的表达式。分析的结果对于七极混频管来说也是基本上适用的。



将讯号  $e_1$  和  $e_3$  加到两个控制栅。阳极电流  $i_a$ ，在忽略了阳极电流对于栅极电位的三次导数以后，可表示为：

$$i_a = i_0 + S_1 e_1 + S_3 e_3 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial S_1}{\partial U_{g1}} e_1^2 + 2 \frac{\partial S_1}{\partial U_{g3}} e_1 e_3 + \frac{\partial S_3}{\partial U_{g3}} e_3^2 \right) \quad (26a)$$

$$\text{其中 } S_1 = \frac{\partial i_a}{\partial U_{g1}} \quad \text{当 } U_{g1} = \text{常数}$$

$$S_3 = \frac{\partial i_a}{\partial U_{g3}} \quad \text{当 } U_{g3} = \text{常数}$$

前面三项肯定是交流分量，我们来看第四项，即括号中的一项。

$$\left. \begin{aligned} \text{设 } e_1 &= E_1 \sin \omega_1 t \\ e_3 &= E_3 \sin(\omega_3 t + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

利用三角变换，则

$$e_1^2 = \frac{1}{2} E_1^2 \cos(\omega_1 - \omega_1)t - \frac{1}{2} E_1^2 \cos(\omega_1 + \omega_1)t$$

$$\text{如果 } \omega_1 = \omega_3 = \omega \text{ 则 } e_1^2 = \frac{1}{2} E_1^2 - \frac{1}{2} E_1^2 \cos 2\omega t \quad (28a)$$

$$\text{同样 } e_3^2 = \frac{1}{2} E_3^2 - \frac{1}{2} E_3^2 \cos 2\omega t \quad (28b)$$

以及

$$e_1 e_3 = \frac{1}{2} E_1 E_3 \cos \theta - \frac{1}{2} E_1 E_3 \cos(2\omega t + \theta) \quad (28c)$$

式(28a, b, c)中第一项是常数即直流分量，第二项是角频率为  $2\omega$  的交变量，将式(28)代入式(26a)整理后可得到：

$$i_a = i_0 + S_1 e_1 + S_3 e_3 - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial S_1}{\partial U_{g1}} E_1^2 + \frac{\partial S_3}{\partial U_{g3}} E_3^2 \right) \cos 2\omega t - \frac{1}{4} E_1 E_3 \cos(2\omega t + \theta) + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial S_1}{\partial U_{g1}} E_1^2 + \frac{\partial S_3}{\partial U_{g3}} E_3^2 \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial S_1}{\partial U_{g3}} E_1 E_3 \cos \theta \quad \dots(26b)$$

$$\text{设 } \frac{\partial S_1}{\partial U_{g1}} = K_1 \quad \frac{\partial S_3}{\partial U_{g3}} = K_2 \quad \frac{\partial S_1}{\partial U_{g3}} = K_3 \quad (29)$$

则式 26 中与  $e_1, e_3$  有关的直流电流分量为

$$\Delta I_a = \frac{1}{4} (K_1 E_1^2 + K_2 E_3^2) + \frac{1}{2} K_3 E_1 E_3 \cos \theta \quad (30)$$

$$\text{或 } \Delta I_a = \Delta I_{a1} + \Delta I_{a2} \quad (31)$$

$$\text{其中 } \Delta I_{a1} = \frac{1}{4} (K_1 E_1^2 + K_2 E_3^2) \quad (32a)$$

$$\Delta I_{a2} = \frac{1}{2} K_3 E_1 E_3 \cos \theta \quad (32b)$$

就是说阳极电流直流分量的变化中有两部分，一部分只单独和  $e_1$  或  $e_3$  有关，另一部分则正比于  $e_1, e_3$  的幅值及相角差三者的乘积。注意到通常在正弦电压  $U \sin \omega t$  作用下，某负载上流过电流  $I \sin(\omega t + \theta)$  负载之消耗的有功功率可表示为

$$P = UI \cos \theta \quad (33)$$

$U, I$  为作用电压及电流的幅值， $\theta$  为电流及电压之相角差。

因此，如果讯号  $e_1$  (或  $e_3$ ) 正比于某一负载的电压  $U$ ，而  $e_3$  (或  $e_1$ ) 则正比于负载上的电流  $i$ ，

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{K_u} U & U &= U \sin \omega t \\ e_3 &= \frac{1}{K_i} i & i &= I \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

则电子管阳极电流中的直流分量  $\Delta I_{a2}$  就恰好正比于该负载上的有功功率  $P$ 。

利用式 34 及式 32b 式 33 可写成

$$\begin{aligned} P &= K_u E_1 \cdot K_i \cdot K_3 \cos \theta \\ &= 2 K_u \cdot K_i \cdot \frac{1}{K_3} \Delta I_{a2} \\ &= K_p \Delta I_{a2} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{其中 } K_p = 2 K_u \cdot K_i \cdot \frac{1}{K_3} \text{ (毫/瓦)} \quad (36)$$

$K_p$  可由实验求得。

因此，只要测出  $\Delta I_{a2}$ ，或者  $\Delta I_{a2}$  在电子管阳极负载上的电压降  $\Delta U_{a2} = R \Delta I_{a2}$ ，就可以测出相应的功率  $P$  来。这就是二极管测量功率的原理。

2. 三次读数法原理（提出一种消除误差的方法）：

从式 (30) 和 (31) 可以看出，讯号引起的阳极直流电流分量中， $\Delta I_1$  将是引起测量误差的一个因素，只有在选择了合适的电子管的工作点，而且讯号  $e_1$  和  $e_3$  不变的情况下，可以做到这一项为零，

$$\text{即 } \Delta I_{a1} = 0 \quad K_1 E_1^2 + K_2 E_3^2 = 0 \quad (37)$$

这时，  $\Delta I_a = \Delta I_{a2}$ ，

$$P = K_p \Delta I_a$$

因此，在这种情况下，可以用一直流电流表串在阳极电路中来测出  $\Delta I_{a2}$  来（这时交流分量的平均值为零，电流计指针不会指出交流分量），从而可以测量该负载上的有功功率。

不过实际上，由于被测负载的参数不可能不变，式 (37) 表示的情况是难于办到的，因此，采用简单的线路  $\Delta I_1$  引起的误差将无法避免，要消除这一误差（可达百分之几百），必须选择良好的电子管，和采用很复杂的线路。下面说明一种简单而有效的办法，读三次数的办法，为方便起见，称为“三次读数法”，其原理如下：

注意式 (30)，如果  $e_1 = 0$ ， $e_3 \neq 0$  则

$$\Delta I_a' = \frac{1}{4} K_2 E_3^2 \quad (38a)$$

如果  $e_3 = 0$ ， $e_1 \neq 0$  则

$$\Delta I_a'' = \frac{1}{4} K_1 E_1^2 \quad (38b)$$

如果  $e_1 \neq 0$ ， $e_3 \neq 0$  则

$$\Delta I_a''' = \frac{1}{2} K_1 E_1^2 + \frac{1}{4} K_3 E_3^2 + \frac{1}{2} K_3 E_1 E_3 \cos \theta \quad (38c)$$

$$\text{因此: } \Delta I_{a2} = \Delta I_{a'''} - (\Delta I_{a'} + \Delta I_{a''}) \quad (39)$$

$$\text{被测功率 } P = K_P [\Delta I_{a'''} - (\Delta I_{a'} + \Delta I_{a''})] \quad (40)$$

可见, 如果将  $e_1$  输入端接地, 只输入  $e_3$ , 再将  $e_3$  输入端接地, 只输入  $e_1$ , 然后  $e_1, e_2$  都输入, 在这三种情况下可分别测出  $\Delta I_{a'}$ ,  $\Delta I_{a''}$  和  $\Delta I_{a'''}$ , 将它们按照式 (39) 进行运算, 可以得到代表有功功率的电流  $\Delta I_{a2}$ 。

通常, 测量的是电流  $\Delta I_a$  在阳极负载上引起的电压降, 这时候, 同样可采用三次读数法, 设阳极负载为  $R$ ,  $\Delta I_a$  在  $R$  上引起的压降为

$$\begin{aligned} \Delta U_a &= \Delta I_a \cdot R \\ &= \Delta I_{a1} R + \Delta I_{a2} R \\ &= \Delta U_{a1} + \Delta U_{a2} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{a'} &= \Delta I_{a'} \cdot R && \text{当 } e_1 \equiv 0 \quad e_3 \neq 0 \\ \Delta U_{a''} &= \Delta I_{a''} \cdot R && \text{当 } e_3 \equiv 0 \quad e_1 \neq 0 \\ \Delta U_{a'''} &= \Delta I_{a'''} \cdot R && \text{当 } e_1 \neq 0 \quad e_3 \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

代表有功功率的那一部分为

$$\begin{aligned} \Delta U_{a2} &= \Delta U_{a'''} - (\Delta U_{a'} + \Delta U_{a''}) \\ &= [\Delta I_{a'''} - (\Delta I_{a''} + \Delta I_{a'})] R \\ &= \Delta I_{a2} R \end{aligned} \quad (43)$$

被测功率  $P$  可表示为

$$P = K_P \frac{\Delta U_{a2}}{R_a} \quad (44)$$

$$P = K_P \frac{\Delta U_{a'''} - (\Delta U_{a'} + \Delta U_{a''})}{R} \quad (45)$$

$$\text{或} \quad P = K_{Pu} [\Delta U_{a'''} - (\Delta U_{a'} + \Delta U_{a''})] \quad (46)$$

$$K_{Pu} = \frac{K_P}{R_a} \quad (47)$$

$K_{\mu}$ 可由试验求得。

阳极电流中与讯号  $e_1, e_3$  有关的直流分量和电子管没有讯号加入时的静态直流电流相比, 要小得多, 从而很难用毫安表直接串接在阳极电路中分辨出来。采用不平衡电桥, 用检流计作指示的方法来测量  $\Delta I_{a2}$  在电子管阳极负载上引起的电压变化, 如图 5 所示, 要好一些。但是除了要采取保护检流计使之不致为高频电流烧坏之措施外, 不平衡电桥本身, 由于检流计内阻很小, 而带来显著的非线性误差。

如果用内阻非常大的电子管直流电压表, 来代替图 6 中的检流计, 如图 6 所示, 这时候, 电桥本身的非线性误差可以消除, 两桥臂电阻  $R_3$  只用来平衡在没有讯号时; 电子管阳极的直流电位, 使电子管指示到零。

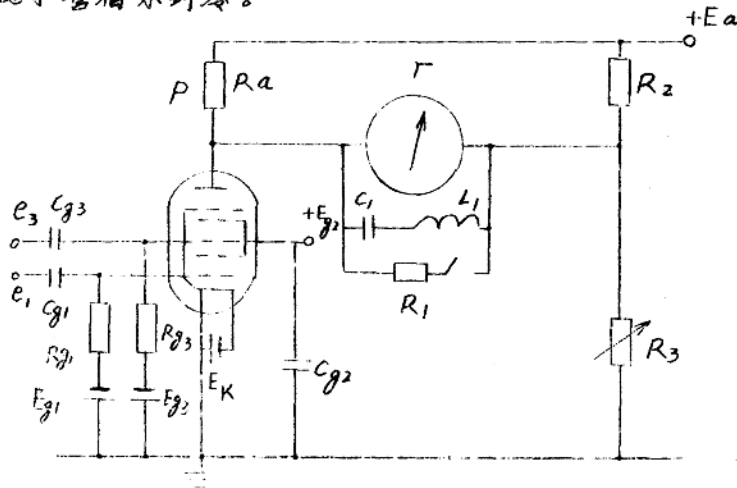


图 5. 用检流计测量阳极直流电流变化的线路

$P$ —七极管;  $\Gamma$ —检流计;  $R_a$ —阳极负载;  $R_2, R_3$ —平衡电阻;  $R_1$ —检流计分流电阻;  $L_1, C_1$ —高频旁路;  $E_a$ —阳极电压;  $E_K$ —灯丝电压;  $E_{g2}$ —屏栅极电压;  $E_{g1}, E_{g3}$ —栅偏压电源;  $C_{g1}, C_{g3}, R_{g1}, R_{g3}$ —耦合电容和栅漏电阻。

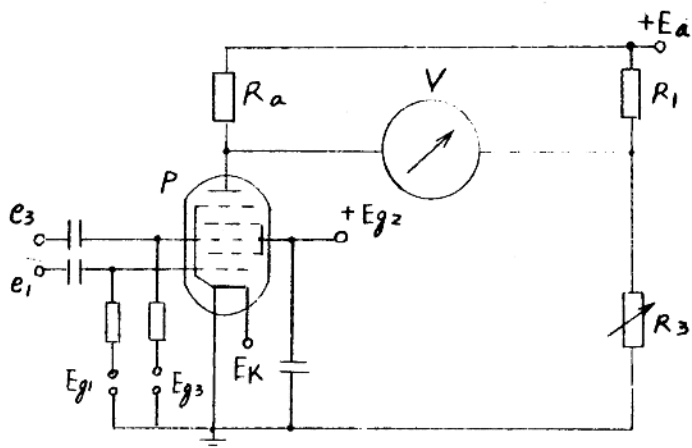


图6. 用真空管直流电压表测量阳极直流分量变化的线路

V—真空管直流电压表；其余符号同图5.

### 3. 实验结果：

在进行实际测量时，均按照上一节所阐述的三次读数法原理进行读数，以下本文所列诸测量结果。除第一次（表1）列出了三次读数的结果之外，其余均只列出按照式43运算出的最后结果。实际测量时的实验线路如图7。

所获得的结果证实了以上所阐述的原理是正确的。图7的原理和图6完全相同，采用不平衡电桥，用真空管电压表作指示仪表。图8中，讯号 $e_1$ 由变压器付边经分压后获得， $e_3$ 则从变压器付边经一可调大小的移相器获得，因此 $e_1$ 和 $e_3$ 的大小及相位角都可改变。 $e_1$ 和 $e_3$ 的大小由真空管电压表测量，相位由示波器判断。

在所有的线路中都采用了直流加热灯丝的七极管1A2 $\Pi$ 。以避免灯丝电压的干扰。

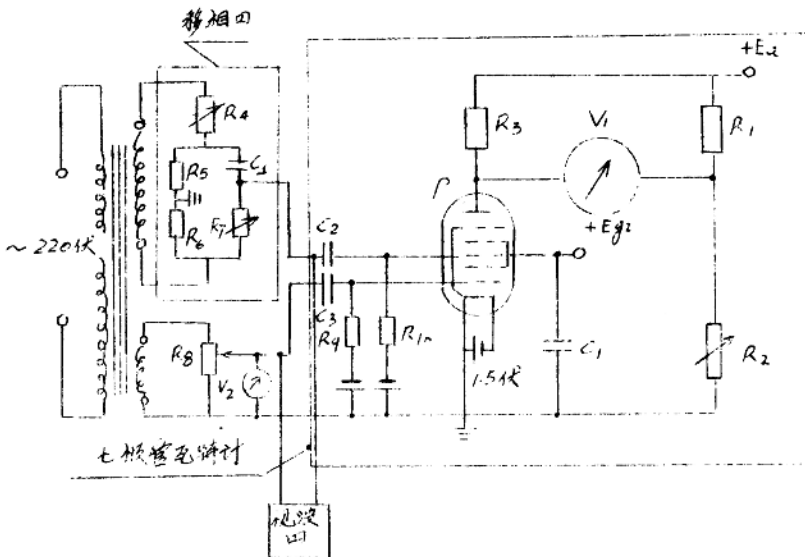


图7. 测量  $E_1, E_2 \cos \theta$  的实验线路

$V_2$  — 毫伏表； $P$  — 七极管 1A2N； $V_1$  — 真空管直流电压表；

以下为用图7所表示的线路，分别改变信号的幅值及相角进行试验的结果。

(1) 当  $\theta = 0$   $\cos \theta = 1$  即  $e_1, e_3$  没有相角差。固定  $e_1$ ，逐步改变  $e_3$ ，测得的结果列于表1， $\Delta U_{a2}$  随  $e_3$  的变化规律如图8所示。在700毫伏之前呈线性关系。

根据实验结果可求出式32b中的系数  $K_3$ ，结果如图9。

$$K_3 = \frac{\Delta U_{a''} - (\Delta U_{a''} + \Delta U_{a'})}{2E_1 E_3 R_a} \quad (43)$$

这里， $E_1, E_3$  为仪表测出的信号  $e_1, e_3$  之有效值。

(2) 当  $\theta = 0$ ，固定  $e_3$ ，逐步改变  $C_1$ ，测量的结果作成曲线如图10，在700毫伏之前，也呈线性关系。

(3) 当  $\theta \neq 0$

根据以上的试验结果, 固定  $E_1 = E_3 = 500$  毫伏保持不变, 以使工作在线性区间。用移相器改变  $C_1, C_3$  之相角, 相角可用示波器进行判断。移相后, 讯号未发生畸变。试验结果绘成图 11, 从图 11 可以看出整个图形仍成较好的正弦形, 但是, 平移了  $+0.5$  伏左右, 这一缺点在采用了图 12 那样的非线性补偿线路以后可以得到克服, 图 13 为这种线路测量的结果。在图 12 中, 增加一个七极管代替图 8 中的电阻  $R_2$ , 七极管第一控制栅接一固定电位, 第二控制栅接入讯号  $E_3$ 。

表 1.  $\theta = 0$  时的测量结果

$E_1$	$E_3$	$\cos\theta$	$R_a$	$\Delta U_a'''$	$\Delta U_a''$	$\Delta U_a'$	$\Delta U_{a2}$	$K_s \times 10^{4m}$
500mV	50mV	1	220K $\Omega$	4.75V	5.20V	0V	-0.45V	0.41
500mV	100mV	1	220K $\Omega$	4.32	5.20	0	-0.88	0.40
500mV	150mV	1	220K $\Omega$	3.88	5.20	0.20	-1.52	0.46
500mV	200mV	1	220K $\Omega$	3.60	5.20	0.55	-2.15	0.49
500mV	250mV	1	220K $\Omega$	3.20	5.20	0.71	-2.71	0.50
500mV	300mV	1	220K $\Omega$	2.15	5.20	0.93	-3.28	0.50
500mV	400mV	1	220K $\Omega$	2.40	5.20	1.50	-4.30	0.49
500mV	500mV	1	220K $\Omega$	2.32	5.20	2.40	-5.28	0.48
500mV	600mV	1	220K $\Omega$	2.43	5.20	3.60	-6.37	0.49
500mV	700mV	1	220K $\Omega$	2.67	5.20	4.77	-7.30	0.48
500mV	800mV	1	220K $\Omega$	3.04	5.20	5.50	-7.66	0.44
500mV	900mV	1	220K $\Omega$	3.51	5.20	6.75	-8.41	0.43
500mV	1000mV	1	220K $\Omega$	3.98	5.20	8.20	-9.42	0.43



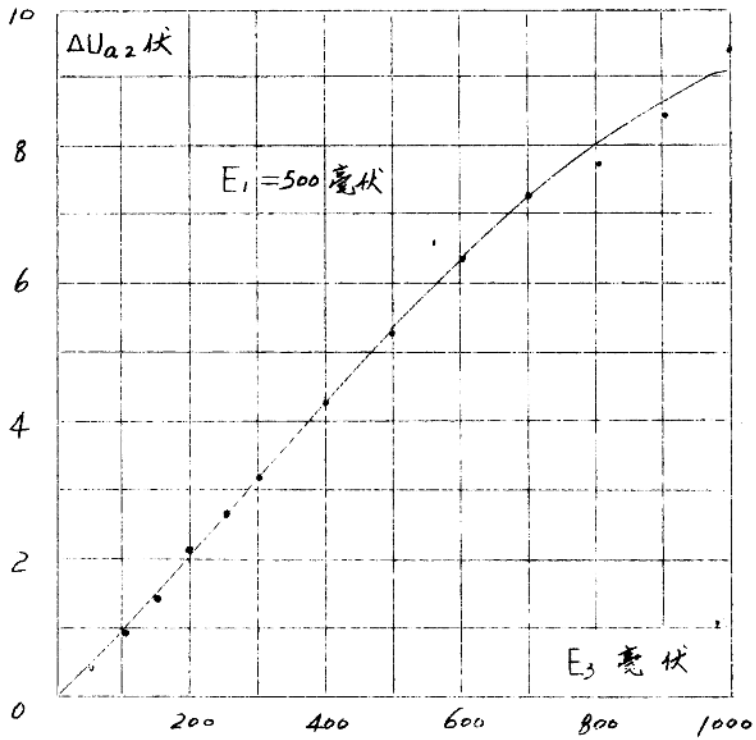


图8.  $\Delta U_{a2}$  随  $E_3$  变化的试验曲线

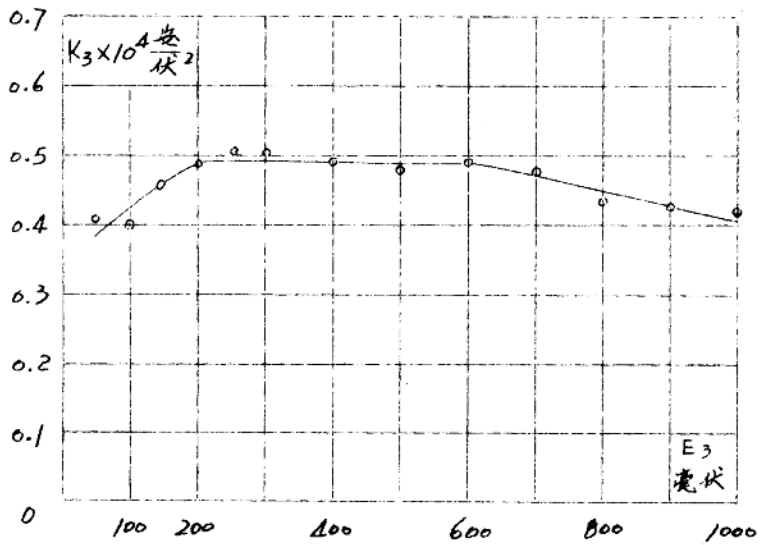


图9.  $K_3$  随  $E_3$  的变化